

长宽比对散粒体材料剪切力学特性的影响

熊健辉¹, 李永强^{1,2}, 陈波¹, 刘旭锋¹, 姬雪明¹, 彭聪¹

(1. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013;

2. 南昌市应急管理局, 江西 南昌 330038)

摘要: 采用4种典型的颗粒形态各向异性材料开展一系列室内三轴力学特性试验, 研究不同长宽比的散粒体材料在剪切过程中的强度与变形变化规律, 结果表明, 长宽比过大或过小对其抗剪强度以及颗粒破碎有较大影响。长宽比最大的散粒体材料强度最弱, 但因为颗粒较长, 在剪切过程中发生弯折, 出现明显的破碎; 相反, 长宽比最小的散粒体材料强度特别大, 最大可达1 MPa, 但最终会因为颗粒破碎的发生导致强度有所下降。长宽比的大小对内摩擦角也存在影响, 二者存在反比关系, 内摩擦角会随着长宽比的增大而减小。

关键词: 长宽比; 三轴剪切; 散粒体; 颗粒破碎

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)06-0527-08

Influence of aspect ratio on shear mechanical properties of granular materials

XIONG Jianhui¹, LI Yongqiang^{1,2}, CHEN Bo¹, LIU Xufeng¹, JI Xueming¹, PENG Cong¹

(1. School of Civil and Architecture Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

2. Nanchang Emergency Management Bureau, Nanchang 330038, China)

Abstract: A series of indoor triaxial mechanical tests were conducted on four types of materials with distinct particle shape anisotropies to investigate the variation in strength and deformation of granular materials with different aspect ratios during the shearing process. Results show that both excessively large and small aspect ratios have a significant impact on the material's shear strength and particle breakage. The material with the largest aspect ratio exhibits the weakest strength; however, due to the elongated particles, noticeable particle breakage occurs as they bend during shearing. In contrast, the material with the smallest aspect ratio demonstrates exceptionally high strength, reaching approximately 1 MPa, but eventually experiences a reduction in strength due to particle breakage. The size of the aspect ratio also influences the internal friction angle, with an inverse relationship; the internal friction angle decreases as the aspect ratio increases.

Keywords: aspect ratio; triaxial shear; granular materials; particle breakage

散粒体材料在日常生活和工程活动中运用广泛, 因其离散性常表现出一些特殊的力学行为。前人研究发现, 散粒体复杂的宏观力学特性主要受材料的颗粒粒径、形态、颗粒间的排列组合方式

以及颗粒间黏结关系的控制^[1], 其原因在于散粒体内部各种细观结构演变规律的不同。

大部分岩土体属于散粒体材料, 且形状各异。颗粒形态的不同会造成其力学特性上的差异。大

收稿日期: 2024-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52068002); 江西省“双千计划”项目(DHSQT32022006, JXSQ2020101041); 东华理工大学博士科研启动基金项目(DHBK2019245)

第一作者简介: 熊健辉(2000—), 男, 江西丰城人, 硕士研究生, 研究方向: 颗粒土剪切特性及本构模型建立。

通信作者: 李永强(1983—), 男, 河南济源人, 副研究员, 博士, 研究方向: 岩土地震工程与波动数值模拟。

多数学者是通过室内试验和离散元数值模拟等方法进行颗粒形态的研究。Nguyen 等^[2]使用离散元法评估了颗粒形状对颗粒材料的一些力学特征响应的影响。Xiao 等^[3]通过一系列不同配比的棱角状和圆形玻璃珠混合砂土的三轴排水压缩试验,系统地研究了颗粒形状对强度、剪胀性和应力-剪胀关系的影响。邱玉芳^[4]采用 CT 扫描方法得到英国石英砂的表观颗粒形态,并在其基础上构建了级配相同但形态不同的试样模型,通过一系列三轴排水试验的模拟,证实了颗粒形状会对土体宏观力学行为产生影响。

国内外学者在颗粒形态研究上多关注于颗粒球度,且采用数值试验的方法,而长宽比对散粒体剪切特性的影响在室内三轴试验研究方面还存在一定空白。本文主要聚焦于颗粒形态上长宽比的不同对散粒体三轴剪切特性的影响,从宏观的角度对其应力-应变以及颗粒破碎现象进行分析,对比不同长宽比试验在剪切过程中力学响应情况,并初步探索长宽比与抗剪强度参数之间的关联性。

1 试验条件与方法

1.1 材料的选取

根据颗粒长宽比的需要,选取 4 种大米作为试验用颗粒材料。如图 1 所示,图中展示了 4 种大米的颗粒形态特征。

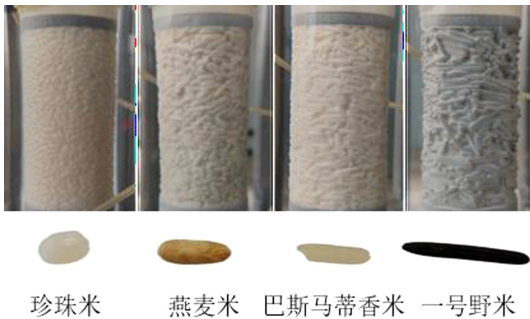


图 1 4 种大米颗粒以及制样后堆积形态

Fig.1 Four types of rice grains and post-sample accumulation patterns

1.2 颗粒密度和尺寸的测量

考虑到不同液体浸泡对大米体积的影响,试验选用水浸法和油浸法测量大米颗粒密度,对比两种方法的测量效果。如表 1 所示,燕麦米密度会稍小些,其余 3 种比较接近。并且发现在短时间内这些米浸泡在水中不会对米粒体积的测量造成很大误

差,用食用油和水测得的颗粒密度非常接近,最终的颗粒密度将采用两种方法测算的平均值。珍珠米、燕麦米、巴斯马蒂香米和一号野米的颗粒密度分别取 1.46、1.29、1.41 和 1.42 g/cm³。

表 1 颗粒密度测量数据

Tab.1 Particle density measurement data						
材料名称	液体名称	米粒质量/ g	初始体积/ mL	混合体积/ mL	颗粒体积/ mL	颗粒密度/ (g · cm ⁻³)
珍珠米	油	1.69	3.00	4.15	1.15	1.47
	水	1.35	3.00	3.93	0.93	1.45
燕麦米	油	2.07	3.00	4.60	1.60	1.29
	水	1.62	3.02	4.29	1.27	1.28
巴斯马蒂香米	油	1.67	3.00	4.20	1.20	1.39
	水	1.92	3.00	4.35	1.35	1.42
一号野米	油	1.63	3.05	4.20	1.15	1.42
	水	1.56	3.02	4.12	1.10	1.42

大米作为类椭球体颗粒材料,包含 3 个尺寸参数,分别为长度、宽度和厚度。本文取颗粒长轴方向两端之间的距离为长度,宽度和厚度大小比较接近,并且同一颗粒因位置的不同也有差别,取长轴方向的中间位置进行宽度和厚度的测量。为了区分宽度和厚度,把除长度外另外两个尺寸参数中较小的作为颗粒厚度。

大米颗粒间具有差异性,为测得 3 个尺寸参数,每种米都随机抽取 100 粒进行测量,每个尺寸参数取其平均值作为相应参数的代表值。表 2 给出了各种大米 3 个尺寸参数各自的平均值和长宽比,由表 2 可知,按长宽比由小到大排序依次为:珍珠米、燕麦米、巴斯马蒂香米和一号野米。

表 2 米粒尺寸参数

Tab.2 Parameters of rice grain size				
材料名称	平均长度/mm	平均宽度/mm	平均厚度/mm	长宽比
珍珠米	4.44	2.77	2.01	1.6
燕麦米	7.42	2.33	1.99	3.2
巴斯马蒂香米	7.68	1.81	1.57	4.2
一号野米	16.18	1.95	1.65	8.3

1.3 试样制备

提前计算出每个实验所需大米的质量,因为缺少一些物理性质指标,在装样前无法直接计算出来。试验中先称取一定质量的颗粒,通过漏斗慢慢倒入对开装样筒中,试验所用对开的装样筒^[5]是专门设计的,用于制备高度为 80 mm,直径为 39.1 mm 的标准试样。装样筒内筒的上部有一圈红色标记线,若试验颗粒高度与之齐平,则代表试样达到了标准,这时将所有颗粒倒出,放入装有油的量筒中以测出试样中颗粒的总体积。按土力学中土颗粒基本物理性质计算方法,可得到试样的孔隙率以及每个试样所需的大米质量,见式(1)~(2)。

$$n = \frac{V - V_s}{V}$$

$$m_s = \rho_s \times V \times (1 - n)$$

式中, V 为试样的体积, mm^3 ; V_s 为试样中颗粒的总体积, mm^3 ; n 为孔隙率, ρ_s 为大米材料的密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; m_s 为所需颗粒的质量, g 。得到每个试样所需称量的质量后,按土工试验规范^[6]制样。

1.4 试验方案

使用一套全自动三轴试验系统,采用干燥大米颗粒试样进行干样三轴剪切试验。考虑围压大小对于试验的影响,在设置围压时,按照 2 倍的梯度关系选取了 4 种大小围压,分别为 25、50、100 和 200 kPa。由于选取的材料长宽比较大,颗粒两端较为尖锐,试验中发现剪切时颗粒两端会与乳胶膜接触相互挤压,试样逐渐出现较大的挤出变形,围压过高,容易导致颗粒将乳胶膜刺破,试样进水,对试样结果产生影响。在围压为 200 kPa 时,出现了大米颗粒刺出,几乎刺破乳胶膜的情况,故没有设置更高围压,将最大围压控制在 200 kPa。试验采用编号“ZZ”、“YM”、“XM”和“YH”分别代表珍珠米、燕麦米、巴斯马蒂香米和一号野米。具体试验方案见表 3。

根据土工试验规范^[6]设置剪切速率为 0.8 mm/min,试验终止条件为轴向应变达到 25%。考虑到剪切过程中大米颗粒会产生不同程度的破碎,需要记录大米试样在剪切前后颗粒形态的变化情况,并通过对比分析试样颗粒破碎的情况。

表 3 大米干样三轴剪切试验方案
Tab.3 Triaxial shear test scheme of dried rice samples

材料名称	反压/kPa	围压/kPa	试验编号
珍珠米	0	25	ZZ-25
	0	50	ZZ-50
	0	100	ZZ-100
	0	200	ZZ-200
燕麦米	0	25	YM-25
	0	50	YM-50
	0	100	YM-100
	0	200	YM-200
巴斯马蒂香米	0	25	XM-25
	0	50	XM-50
	0	100	XM-100
	0	200	XM-200
一号野米	0	25	YH-25
	0	50	YH-50
	0	100	YH-100
	0	200	YH-200

2 试验结果与讨论

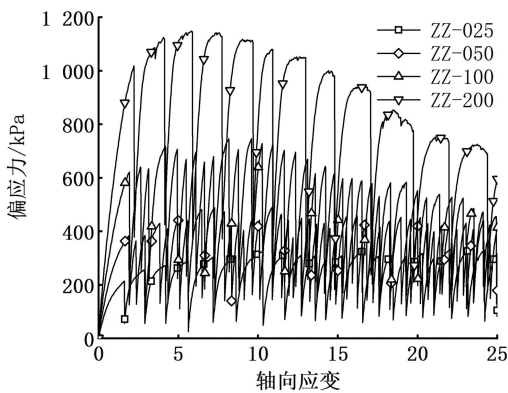
2.1 试验结果分析

各种大米在不同围压下的应力-应变关系曲线如图 2 所示,4 种不同长宽比的大米材料应力-应变曲线都为应变软化型,且随着围压的升高,强度明显提升。在低围压下偏应力都随着轴向应变的增加呈现先增加后趋于平稳的趋势,而在高围压下偏应力为先增加后减小的趋势,应力-应变曲线呈现驼峰状。此外,不同长宽比的大米材料应力-应变曲线也表现出了显著差异。

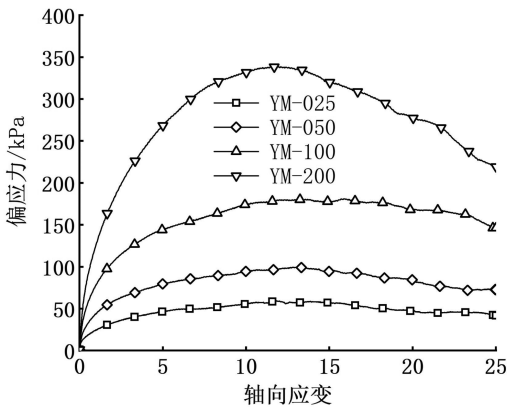
4 种大米中,除燕麦米的应力-应变曲线平滑外,其他大米试样的应力-应变曲线呈现多种形式的跳动,并且其波动程度随围压提高而加剧。对于珍珠米,其剪切强度较高,有效围压 200 kPa 时,偏应力峰值达到了兆帕级别,但其偏应力跌落值也非常大,跌落的幅度随围压的提高而加剧。在试验过程中,发生应力值跌落时,可以听到较大的响声,这是由颗粒发生破碎造成的。巴斯马蒂香米应力-应变曲线的波动频率要比珍珠

米更剧烈,但其波动幅值没有珍珠米高。燕麦米和一号野米的应力-应变曲线相似,不过一号

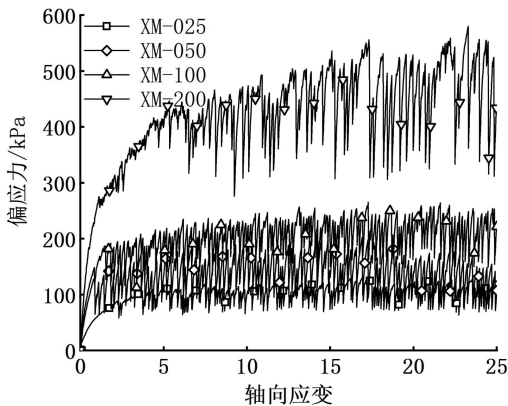
野米应力-应变曲线有一定程度的波动,燕麦米则较平滑。



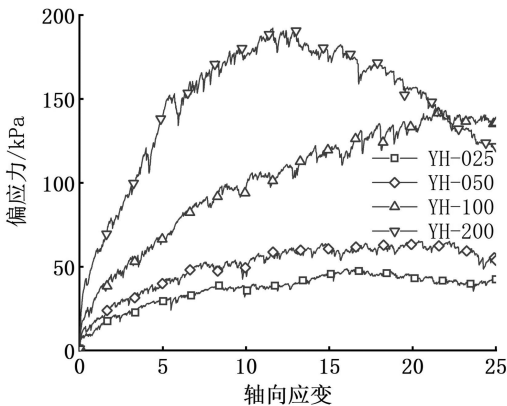
(a) 珍珠米



(b) 燕麦米



(c) 巴斯马蒂香米



(d) 一号野米

图 2 不同围压下各种米的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of various types of rice under different confining pressures

从峰值偏应力来看,在不同围压下 4 种大米材料峰值偏应力都随着围压的增加而提高,但不同长宽比的峰值偏应力随围压增长的速率会有所不同。如图 3 所示,图中拟合所得直线的斜率,即代表峰值偏应力随围压增长的速率,可以看出,长宽比最小的珍珠米峰值偏应力有着最大增长速率,而长宽比最大的一号野米,其峰值偏应力增长速率最低。

4 种材料长宽比差异较大,对制样后试样的初始孔隙率也有影响。图 1 给出了 4 种大米剪切前的试样图片,可以看到,珍珠米颗粒之间嵌合紧密,显得非常致密,燕麦米和一号野米则有许多孔隙,尤其一号野米,颗粒太长导致试样孔隙比很大,巴斯马蒂香米比燕麦米和一号野米更为密实些。

长宽比的不同对剪切过程中孔压变化也有明

显的影响。图 4 为不同围压下各种米的孔压发展情况。

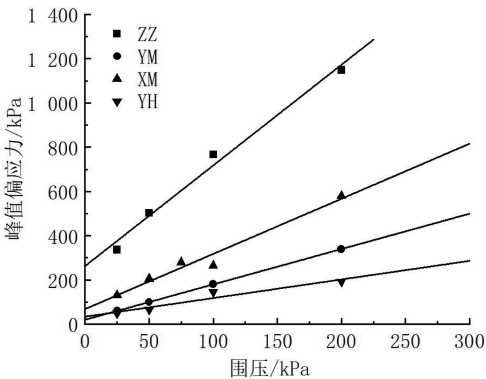


图 3 不同围压下各种米的峰值偏应力与围压的关系
Fig.3 Relation between peak deviatorial stress and confining pressure of various types of rice under different confining pressure

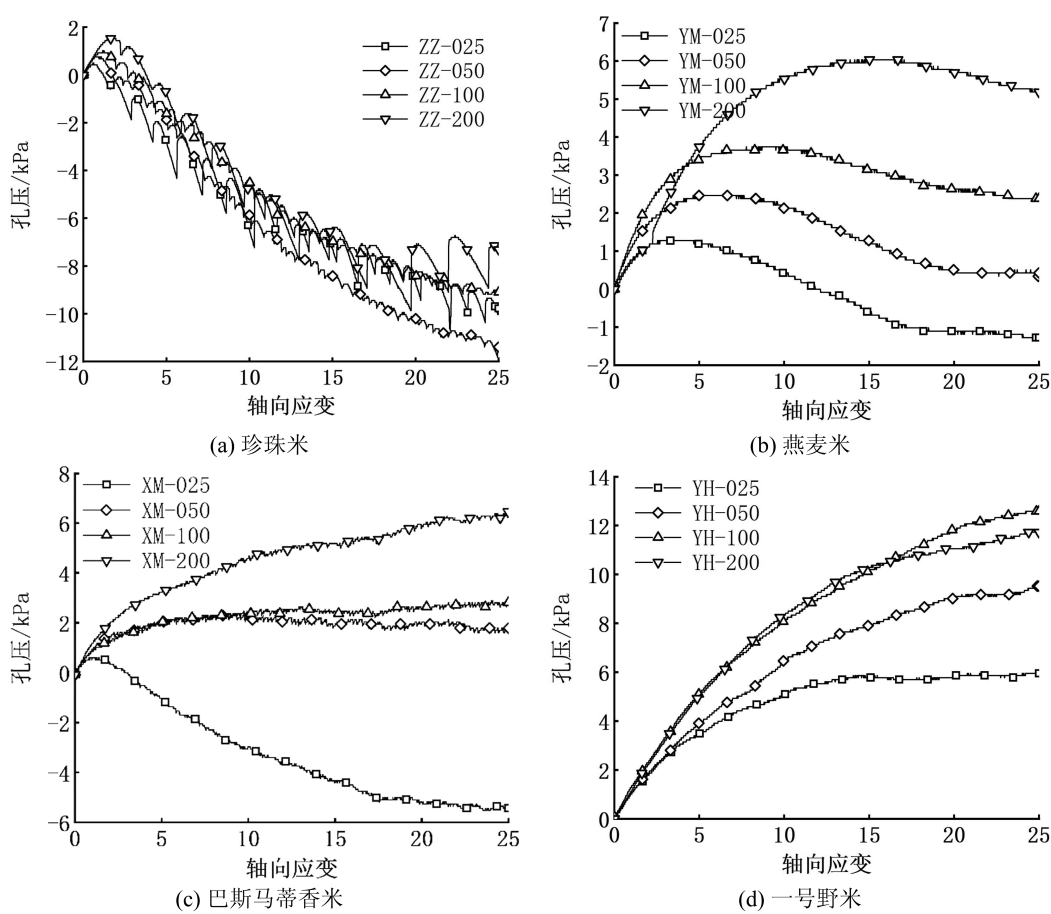


图 4 不同围压下各种米的孔压发展

Fig.4 Pore pressure development of various types of rice under different confining pressures

从图 4 可知,不同长宽比大米的孔压变化范围都没有太大,但随围压提高,孔压的变化量也会增加,并且在剪切过程中孔压的发展情况有着明显的区别。珍珠米孔压的发展是先增加后减小的趋势,试样剪切后会先因试样剪缩产生一小段正孔压,随后孔压持续下降。燕麦米与珍珠米的孔压发展趋势类似,但是燕麦米试样的剪缩过程明显更长。巴斯马蒂香米试样以剪缩为主,25 kPa 围压时出现了负的孔压。一号野米则产生相对比较大的正的孔压,试样一直在剪切压缩。从各种米的有效应力路径来看,因为孔压变化量不大,有效应力路径近似一条斜直线,但一号野米因为剪缩较明显,孔压一直增长,导致有效应力路径弯向左侧,如图 5 所示。

2.2 长宽比对颗粒破碎的影响

结合图 2 中各种大米的应力-应变变化曲线,分析不同长宽比大米材料的颗粒破碎现象。大米材料本身具有易破碎的性质,其应力-应变

的跳动情况与颗粒破碎有较大关系。图 6 展示了各种大米在不同围压下剪切后的比较典型的破碎情况。珍珠米剪切前的颗粒即装样所用颗粒都是经过筛选相对完整的,剪切后颗粒碎粒非常多,还可见许多粉末状的碎屑,橡胶膜内部也有很多米的碎屑,并且随着围压的增大,其破碎程度明显加剧;一号野米因为颗粒较长,在各围压下同样破碎显著;巴斯马蒂香米在各个围压条件下剪切后也都有较为明显的破碎;燕麦米在这几个围压下,剪切后颗粒基本上看不到明显的破碎。如果对颗粒破碎程度排序,珍珠米破碎最显著,一号野米次之,巴斯马蒂香米较明显,燕麦米最弱。

对比应力-应变曲线,可以发现颗粒破碎情况与偏应力陡降的幅度是相对应的,颗粒陡降幅度越大,颗粒破碎越明显。结合颗粒长宽比分析,长宽比过大或过小都会产生明显的颗粒破碎情况。长宽比大意味着颗粒较长,剪切过程中颗粒受力容易产生弯矩而折断,试样会一直处于压密

状态,持续发生剪切压缩。长宽比较小会对其强度产生较大影响,从而会影响其颗粒破碎的情况。长宽比为 1.6 的珍珠米,其强度特别大,颗粒间排列会更加紧密,试样孔隙较小,这就决

定了珍珠米的强度会高于其他几种材料,同时峰值强度能达到兆帕级别,远超其他长宽比的颗粒。但由于米粒自身强度有限,最终会产生明显的颗粒破碎。

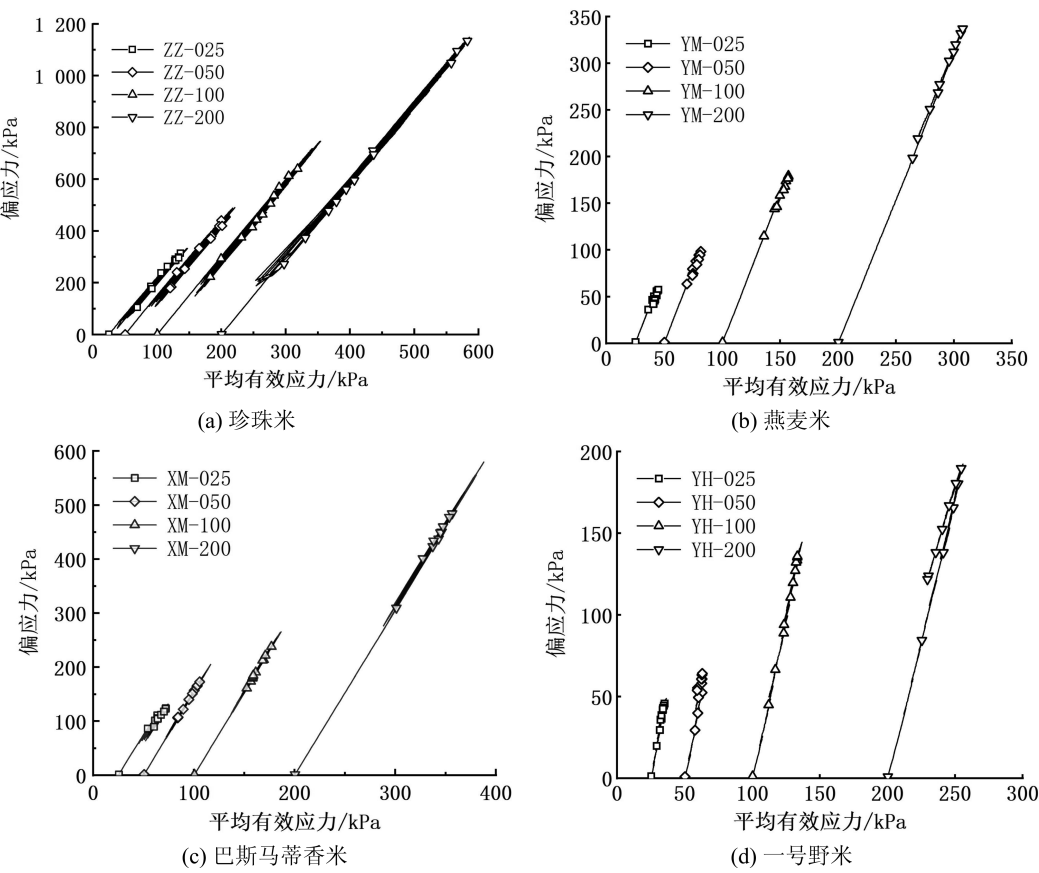


图 5 不同围压下各种米的有效应力路径

Fig.5 Effective stress paths of various types of rice under different confining pressures

图 7 给出了 4 种大米剪切前后电镜扫描下的颗粒表面破坏特征图像,发现珍珠米、巴斯马蒂香米、一号野米表面光滑,燕麦米表面粗糙并附着大量植物纤维。从颗粒破碎情况看,与试验发现破碎情况保持一致。珍珠米破碎情况最严重,甚至出现了细粉颗粒;一号野米次之,长条颗粒发生多处断裂,断裂面平整,由于颗粒较长,一号野米在电镜下不能观察到全貌;巴斯马蒂香米也出现明显断裂面,但部分断裂面并没有完全断开;燕麦米没有出现明显破碎现象。珍珠米因为偏应力非常大,其颗粒破碎的程度也更强,会出现较多粉末和碎屑,巴斯马蒂香米和一号野米颗粒较长,颗粒破碎更多地表现为被折成好几段。

2.3 长宽比对抗剪强度参数的影响

根据土力学经典的莫尔-库伦强度理论^[7],

土体的抗剪强度主要由黏聚力和内摩擦角两部分组成,公式表示为:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \tag{3}$$

式中, τ 为土的抗剪强度, kPa; σ 为剪切面上的法向应力, kPa; φ 为内摩擦角, ($^{\circ}$); c 为黏聚力, kPa。为探究粒径与有效抗剪强度参数之间的关系,以试验中玻璃砂剪切破坏时对应的峰值偏应力的一半,即 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} / 2$ 为半径,以最大和最小主应力的均值 $(\sigma_1 + \sigma_3)_{\max} / 2$ 为圆心,通过 Excel 表格绘制 4 种不同围压下的极限摩尔应力圆,并作抗剪强度包络线,如图 8 所示。画出包络线后,由库伦公式参数反演得到有效内摩擦角和黏聚力。通过图 9 中内摩擦角随长宽比增大而减小的变化关系,结合各种长宽比大米的初始孔隙比情况,分析这是由于材料长宽比越大,颗粒孔隙比越大,相

对而言更加松散,所以内摩擦角会随着长宽比的增大而减小。

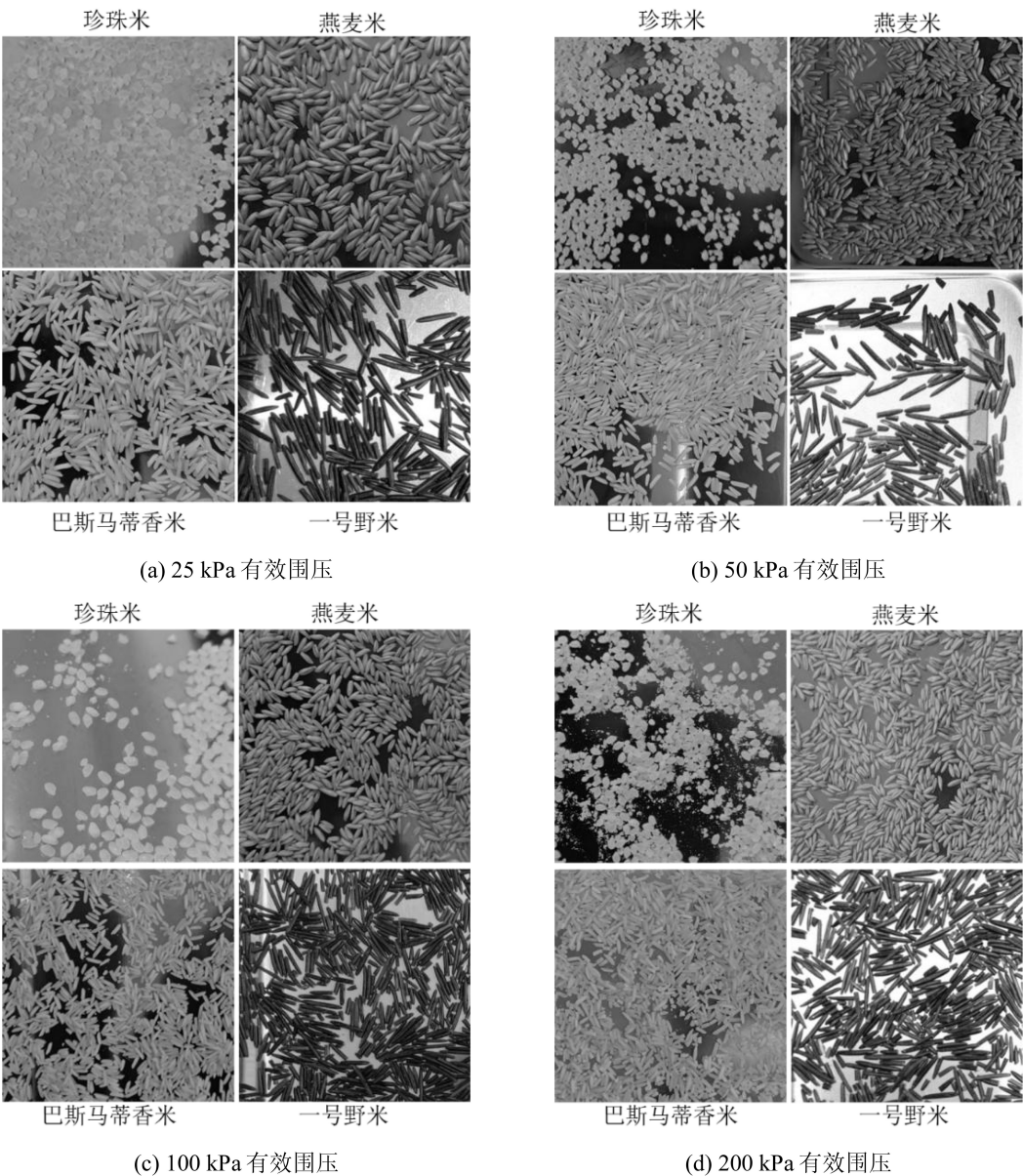


图 6 不同围压下大米剪切后破碎情况

Fig.6 Breakage of rice after shearing under different confining pressures

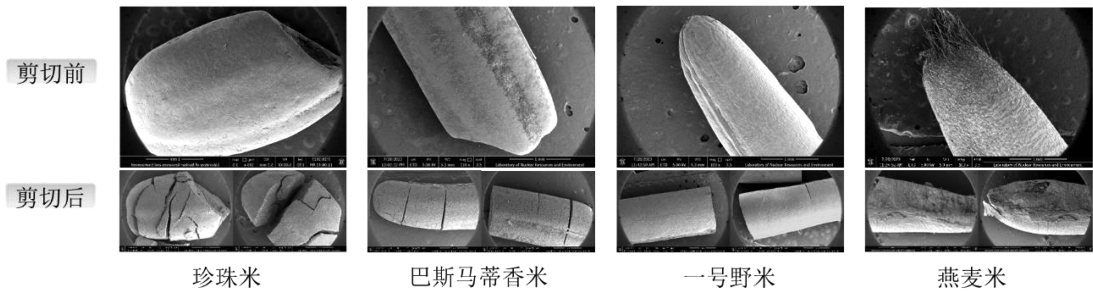


图 7 4 种大米剪切前后扫描电镜 (SEM) 对比图

Fig.7 Scanning electron microscope comparison of four types of rice before and after shearing

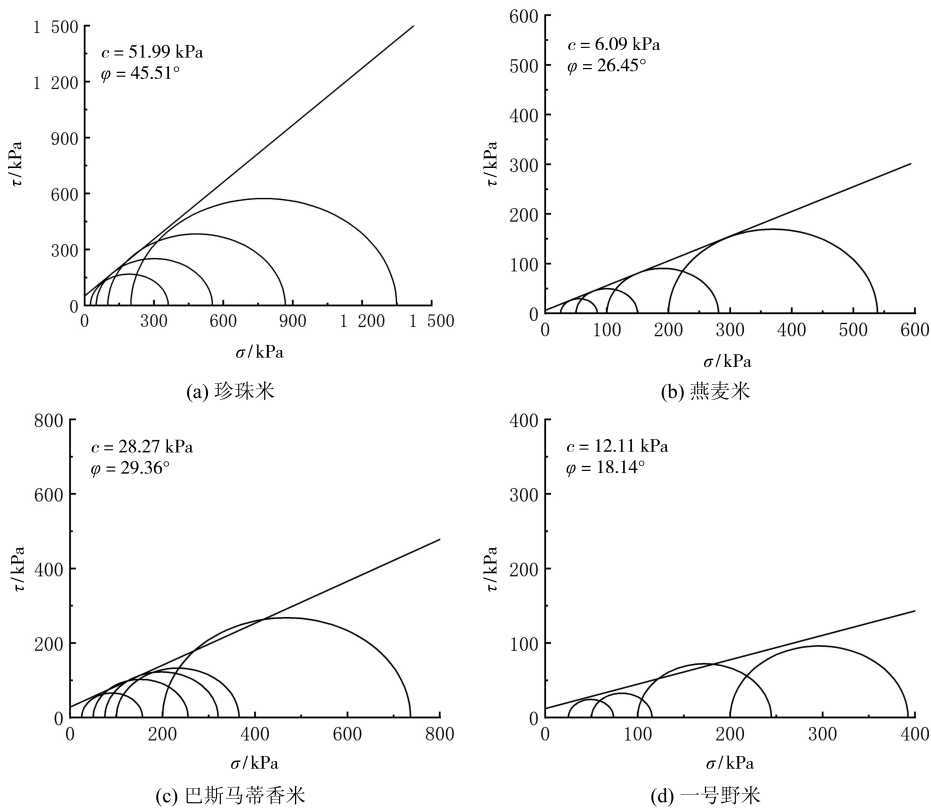


图 8 不同长宽比大米的极限摩尔应力圆
Fig.8 Limiting molar stress circles of rice with different aspect ratios

同时,对比 4 种不同长宽比材料的内摩擦角,发现所得的内摩擦角都随长宽比的增大而减小,且两者变化关系接近反比例函数关系,并对参数进行线性拟合,得到内摩擦角和长宽比大小关系满足式(4)。

$$\varphi = d^{-0.553} + 57.966 \tag{4}$$

式中,φ 为内摩擦角,(°);d 为长宽比。拟合曲线如图 9 所示。

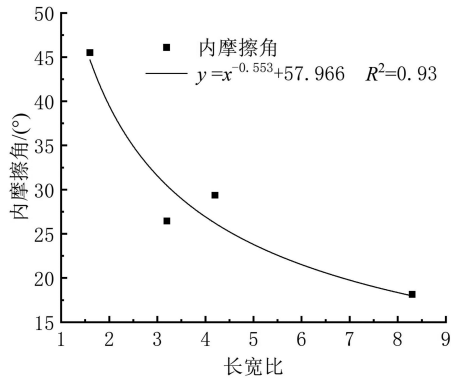


图 9 内摩擦角随长宽比变化曲线

Fig.9 Curve of internal friction angle changing with aspect ratio

3 结论

1) 采用水浸法和油浸法测量不规则大米材料的体积,发现两种方法的测量效果接近,说明在短时间内浸泡,材料的吸水性不会对材料体积的测量造成较大误差,可以为其他不规则材料的体积测算提供参考;并且提出了一种选取不规则长条形颗粒的长度、厚度、宽度 3 种尺寸的方法,获得了 4 种大米的长宽比,所得的长宽比能准确体现颗粒特征。

2) 长宽比过大或过小对其强度影响较大。长宽比大意味着颗粒较长,试样整体孔隙多,其抗剪强度较低,并且会发生明显的颗粒破碎现象,试样会持续发生剪切压缩。长宽比较小,颗粒间排列会更加紧密,试样孔隙较小,其抗剪强度较高,但由于米粒自身强度有限,最终会因为颗粒破碎导致偏应力值的急剧跌落。

3) 不同长宽比的散粒体材料抗剪强度参数差异较大。颗粒的长宽比与内摩擦角存在反比例关系,长宽比越大,颗粒间孔隙比越大,相对而言更加松散,内摩擦角会随着长宽比的增大而减小。

(下转第 541 页)

[5] 陶飞,刘蔚然,张萌,等.数字孪生五维模型及十大领域应用[J].计算机集成制造系统,2019,25(1):1-18.

[6] 尤志嘉,郑莲琼,冯凌俊.智能建造系统基础理论与体系结构[J].土木工程与管理学报,2021,38(2):105-111,118.

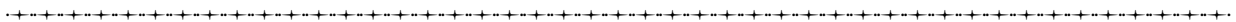
[7] TAPALE M T,BIRJE M N,CHALLAGIDAD P S,et al. Cloud computing review: concepts, technology, challenges and security[J]. International Journal of Cloud Computing,2017,6(1):32.

[8] 薛阳,蒋黎垣.精益建造与智能建造协同发展研究[J].中国建设信息化,2023(20):100-103.

[9] 陆震,刘洪霞.面向管理驾驶舱的大数据平台架构与应用[J].江苏通信,2021,37(1):86-89.

[10] MRUGALSKA B,WYRWICKA M K. Towards lean production in industry 4.0[J]. Procedia Engineering, 2017, 182:466-473.

(责任编辑:陈雯)



(上接第 534 页)

参考文献:

[1] 井旭,谢婉丽,单帅.原状及重塑黄土双轴试验微观力学特征离散元模拟[J].地质科技通报,2021(3):184-193.

[2] NGUYEN H B K,RAHMAN M M,FOURIE A B. How particle shape affects the critical state,triggering of instability and dilatancy of granular materials—results from a DEM study[J]. Géotechnique,2021,71(9):749-764.

[3] XIAO Y,LONG L H,MATTHEW EVANS T,et al. Effect of particle shape on stress-dilatancy responses of medium-dense sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2019,145(2):1-15.

[4] 邱玉芳.颗粒形态影响砂土临界状态力学行为的离散元研究[D].武汉:华中科技大学,2018.

[5] 李永强,陈波,卢玢宇,等.砂性土初始孔隙比可复现制样装置:CN216978557U[P]. 2022-07-15.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

[7] 甘怡东,徐东升,魏龙海,等.级配效应下珊瑚砂不排水剪切特性研究[J].武汉理工大学学报,2023,45(7):95-101.

(责任编辑:陈雯)